

УДК 523.9

В. А. Котов, В. И. Ханейчук, Т. Т. ЦапНаучно-исследовательский институт «Крымская астрофизическая обсерватория»
98409 Крым, п. Научный

Пульсации Солнца: 30 лет измерений

Начиная с 1974 г. в Крымской астрофизической обсерватории регулярно измеряются колебания фотосферы Солнца как звезды. В эксперименте солнечный магнитограф Бэбкока регистрирует разность эффекта Доплера (фраунгоферовой линии поглощения Fe I λ 512.4 нм) между центральной и краевой зонами солнечного диска. За последние 30 лет получены данные для 1807 дней (в сумме более 11 тыс. ч). В спектре мощности колебаний лучевой скорости есть достоверный пик, отвечающий периоду $P = 159.9655 \pm 0.0005$ мин. Он в пределах ошибки согласуется с периодом 159.9663 ± 0.0008 мин, полученным ранее по независимым измерениям в Стэнфорде за 1977—1994 гг., что свидетельствует о его солнечном происхождении. Колебание имеет почти неизменную начальную фазу в течение всего 30-летнего интервала и отличается существенно негармоническими средними профилями возмущений скорости и радиуса. Истинная природа явления и источник возбуждения неизвестны. Предполагается, что периодическое колебание фотосферы обусловлено сверхбыстрым вращением центрального ядра Солнца.

ПУЛЬСАЦІЇ СОНЦЯ: 30 РОКІВ ВИМІРЮВАНЬ, Котов В. А., Ханейчук В. І., Цап Т. Т. — Починаючи з 1974 р. в Кримській астрофізичній обсерваторії регулярно вимірюються коливання фотосфери Сонця як зірки. В експерименті сонячний магнітограф Бабкока реєструє різницю ефекту Доплера (фраунгоферової лінії поглинання Fe I λ 512.4 нм) між центральною та крайовою зонами сонячного диска. За останні 30 років отримано дані для 1807 днів (понад 11 тис. год). У спектрі потужності коливань променевої швидкості є достовірний пік, що відповідає періоду $P = 159.9655 \pm 0.0005$ хв. У межах помилки він збігається з періодом 159.9663 ± 0.0008 хв, отриманим раніше із незалежних вимірювань у Стенфордї за 1977—1994 рр., що свідчить про його сонячне походження. Коливання має майже незмінну початкову фазу протягом усього 30-річного інтервалу і відзначається істотно негармонічними середніми профілями збурень швидкості та радіуса. Істина природа явища і джерело збудження невідомі. Припускається, що періодичне коливання фотосфери зумовлене надшвидким обертанням центрального ядра Сонця.

PULSATIIONS OF THE SUN: 30 YEARS OF MEASUREMENTS, by Kotov V. A., Haneychuk V. I., Tsap T. T. — Regular measurements of oscillations of the Sun-as-a-star's photosphere have been performed at the Crimean Astrophysical Observatory since 1974. In this experiment, a Babcock

solar magnetograph detects Doppler effect difference between the central part and the limb part of the solar disk (using the Fraunhofer absorption line Fe I λ 512.4 nm). Over last 30 years the measurements were made during 1807 days (in aggregate more than 11 thousand hours). The most significant peak of the power spectrum of the line-of-sight velocity variations corresponds to the period $P = 159.9655 \pm 0.0005$ min. The period is in good agreement, within the error limit, with the Stanford value 159.9663 ± 0.0008 min, inferred before from the independent 1977—1994 measurements, which supports strongly solar origin of the period. This oscillation has nearly constant initial phase over the total 30-year interval and reveals substantially non-harmonic mean profiles of both, velocity and radius, perturbations. The true physical nature of the P phenomenon and the source of its excitation are unknown. It is supposed that the periodic oscillation of the Sun's photosphere is caused by superfast rotation of the central solar core.

ВВЕДЕНИЕ

В 1974 г. Роксбург [11] предположил, что центральное ядро Солнца вращается с периодом порядка часа. Тогда это в определенной мере помогало объяснять дефицит солнечных нейтрино: быстрое вращение должно вести к уменьшению давления в ядре, и следовательно, его средней температуры. Следствием сверхбыстрого вращения, по этой гипотезе, должны быть периодические вертикальные возмущения фотосферы, которые могут быть зарегистрированы при хорошей чувствительности инструмента и достаточном времени накопления сигнала лучевой скорости.

В связи с проблемой внутреннего строения Солнца в том же 1974 г. двумя группами астрофизиков [7, 14] была предпринята попытка зарегистрировать глобальные периодические колебания фотосферы Солнца малой амплитуды порядка 1 м/с. В 1976 г. они сообщили об обнаружении когерентного колебания фотосферы с периодом 160 мин, позднее подтвержденном наблюдениями в Солнечной обсерватории им. Дж. Уилкокса Стэнфордского университета [13].

Более точное значение периода по наблюдениям 1974—1982 гг. оказалось равным $P_0 = 160.0101 \pm 0.0016$ мин; средняя гармоническая амплитуда $A = 0.53$ м/с в крымской шкале дифференциальных доплеровских измерений скорости. После 1982 г. колебание P_0 , однако сменилось на близкое по периоду колебание $P_1 \approx 159.966$ мин. Новый период почти совпал с периодом годового спутника P_0 , т. е. с величиной 159.961 мин [9].

Важен тот факт, что значения P_1 в двух сериях измерений строго совпали: Крым — 1974—1995 гг., период $P_C = 159.9662 \pm 0.0006$ мин, Стэнфорд — 1977—1994 гг., период $P_S = 159.9663 \pm 0.0008$ мин.

Полный ряд наблюдений Крымской астрофизической обсерватории (КраО), охватывающий уже 30 лет, обостряет проблему P_1 -колебания Солнца.

О МОДУЛЯЦИИ ВСПЫШЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ СОЛНЦА

Наиболее точное значение P_0 получено в работе [2] по начальным моментам хромосферных вспышек балла $B \geq 1$ за 1947—1980 гг., т. е. в циклах 18—21: $P_0 = 160.0102 \pm 0.0002$ мин, с достоверностью 4σ ; число вспышек 18877 (доверительная вероятность эффекта 99.994 %). Поиск *априорной* периодичности P_0 во вспышках основывался не на гармоническом анализе, а на критерии χ^2 , при котором статистически значимый сигнал может иметь произвольный профиль, не обязательно синусоидаль-

ный (имеется в виду распределение числа событий по фазе от 0 до 1). Это, в свою очередь, увеличивало частотное разрешение периодограмм примерно вдвое по сравнению с методом Фурье-преобразования.

Недавно Бай [6] рассмотрел моменты рентгеновских вспышек за 19—23-е циклы (в основном по данным спутника GOES) и не обнаружил периодичности 160.010 мин ни в одном из циклов, но показал существенную периодичность 160.320 мин (98.6 %) в 21-м цикле и 160.691 мин (99.1 %) в 19-м. Этот анализ, однако, трудно сопоставить с результатом [2] по следующим причинам.

1. Каждая вспышка сопровождается мягким X-излучением; но не каждое X-событие GOES можно связать с H_{α} -вспышкой (X-события характеризуют корональную активность Солнца, обусловленную транзитными явлениями и корональными выбросами массы, а не только H_{α} -вспышками).

2. Профиль временной модуляции вспышек [2] резко несинусоидальный, и потому к ним практически неприменим квазигармонический анализ Бай.

3. Из-за методических особенностей частотное разрешение периодограмм Бай [6] на порядок хуже, чем в работе [2].

4. Несопоставимо число событий: около 19 тыс. в [2] и, например, от 168 до 667 для цикла 21 в [6].

В связи с дискуссией [2, 6] особый интерес представляет анализ около 50 тыс. хромосферных вспышек и субвспышек за 1975—1991 гг. (согласно «Solar Geophysical Data»), выполненный в 1992 г. Котовым и Шеррером (неопубликовано). Периодограмма χ^2 , построенная методом [2], показала наличие колебаний периода 160.0104 ± 0.0004 мин в данных 1975—1982 гг. с доверительной вероятностью 99.95 % (3.5σ). Этот же период проявился и в *обеих* независимых выборках 1975—1982 гг.: сильные события ($B \geq 1$) и слабые события ($B < 1$). Вспышки 1983—1991 гг. не показали существенной P_0 -периодичности.

Последний результат, вместе с выводами [2], — сильное подтверждение P_0 -пульсации фотосферы Солнца в 1974—1982 гг. Но ниже будем рассматривать только новое колебание P_1 в полном ряду наших доплеровских измерений Солнца.

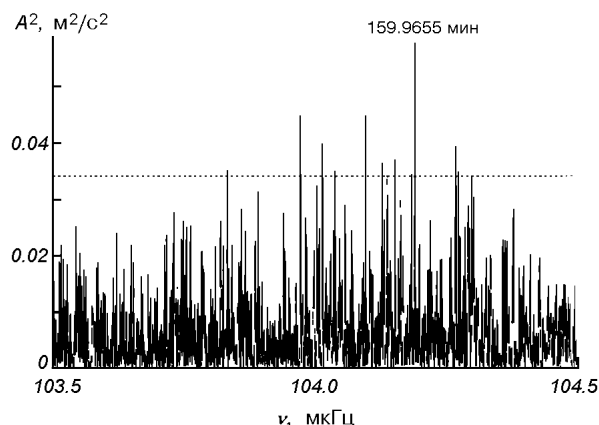
НАБЛЮДЕНИЯ 1974—2003 ГГ.

В КРАО применяется дифференциальный метод, в котором измеряется разность средней лучевой скорости между центральной круговой зоной солнечного диска радиусом $0.66R$ и остальной, внешней, кольцевой зоной. Измерения ведутся по линии поглощения Fe I λ 512.37 нм с нулевым фактором Ланде. Разностный сигнал магнитографа интегрируется каждую минуту, и весь 30-летний массив состоит из 667030 таких «минутных» значений дифференциальной скорости. При обработке данные усредняются за каждые 5 мин, а медленные тренды представляются параболой и вычитаются [3, 9]. Полное число остатков составило $N = 133406$, стандартное отклонение $\sigma = 6.3$ м/с. В сумме это составляет 11117 ч на протяжении 1807 дней с 1974 по 2003 гг.; начальная фаза соответствует UT 00^h00^m 1 января 1974 г. Положительные значения скорости V соответствуют состоянию «расширения» Солнца.

СПЕКТР МОЩНОСТИ

Как говорилось выше, в спектре мощности (СМ) стэнфордских измерений максимальный пик отвечает периоду $P_S = 159.9663 \pm 0.0008$ мин [9]; его

Рис. 1. Спектр мощности колебаний Солнца по измерениям КраО в 1974—2003 гг. ($N = 133406$); пунктирная линия — уровень 3σ



будем считать *априорным* пиком. Заметим, что без априорной информации поиск периодичности практически был бы невозможен из-за шумов и многочисленных пробелов в наблюдениях.

Периодограмма, или СМ, вблизи 9-й суточной гармоники, вычисленная посредством фурье-преобразования для нашего 30-летнего ряда, показана на рис. 1. При длительности ряда $L = 30$ лет разрешение по частоте $\Delta\nu = 1/L \approx 1$ нГц, поэтому спектр сосчитан с шагом 0.2 нГц. Максимальный пик отвечает периоду $P_1 = 159.9655 \pm 0.0005$ мин с амплитудой $A = 0.24$ м/с. Его *априорная* достоверность W , определенная по критерию Скаргля [12], составляет 99.95 % (3.5σ). В пределах ошибки период согласуется с P_S , поэтому его *фактическая* достоверность равна 99.95 %. Вероятность любого другого пика на рис. 1 необходимо умножить на число независимых частот, поэтому все они статистически несущественны по сравнению с P_1 .

О – С

В качестве пробного взят период $P'_1 = 159.9600$ мин, и для данных каждого последовательного двухлетнего интервала методом наименьших квадратов, МНК, вычислены амплитуды A и фазы φ максимума синусоиды с периодом P'_1 . Распределение φ на рис. 2 показывает прогрессивное увеличение фаз со временем. Это значит, что реальный период несколько длиннее, чем P'_1 . (На

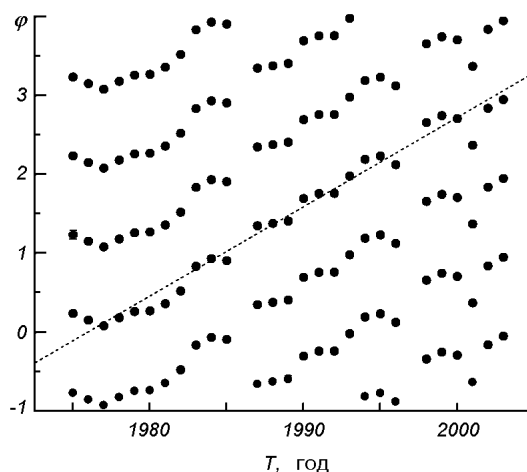


Рис. 2. Диаграмма «О – С» для пробного периода $P'_1 = 159.9600$ мин. Типичная ошибка фазы сравнима с размером точки, наклон пунктирной прямой регрессии отвечает периоду $P = 159.9655 \pm 0.0005$ мин

рисунке отсутствуют фазы 1985—1986 гг. и 1996—1997 гг., когда средние P_1 -кривые оказались несущественными. Подчеркнем, что оба эти интервала относятся к минимумам солнечной активности. Заметно отклонение от линейного хода в 2000—2001 гг., но оно не играет существенной роли при определении коэффициента корреляции и наклона прямой регрессии.)

Через 27 точек, постепенно увеличивающих фазу, проведена прямая регрессии, наклон которой соответствует *фактической* периодичности

$$159.9655 \pm 0.0005 \text{ мин.}$$

Коэффициент корреляции составил 0.99, что соответствует достоверности 99.9 % линейного поведения фаз со временем. Видно также, что начальная фаза оставалась практически неизменной на протяжении всех 30 лет.

Подчеркнем, что впервые о сдвиге пульсации от P_0 к P_1 сообщалось на основе совместных измерений КрАО — Стэнфорда за 1974—1991 гг. [10]. Тот результат следует понимать как априорную информацию. Сохранение после 1991 г. амплитуды P_1 -колебания и особенно ее начальной фазы служит еще одним весомым доказательством наличия в наших измерениях реального когерентного колебания P_1 .

СРЕДНИЕ КРИВЫЕ ПУЛЬСАЦИИ

Наблюдения были разбиты на две равные части по времени: 1974—1988 гг. ($N = 74359$), и 1989—2003 гг. ($N = 59047$). Средние P_1 -кривые для обеих частей приведены на рис. 3. Они имеют практически одинаковые в пределах ошибок фазы и амплитуды:

$$1974\text{—}1988 \text{ гг.: } \varphi = 0.72 \pm 0.03, A = 0.22 \pm 0.03 \text{ м/с,}$$

$$1989\text{—}2003 \text{ гг.: } \varphi = 0.79 \pm 0.04, A = 0.27 \pm 0.05 \text{ м/с.}$$

На рис. 4 приведена суммарная кривая за 30 лет с параметрами: $\varphi = 0.75 \pm 0.03$, $A = 0.24 \pm 0.03$ м/с. Заметны отклонения всех кривых от синусоид. Отметим, в частности, сильный всплеск скорости V на фазе 0.78, достигающий 2.4 типичной ошибки. Эти отклонения могут дать дополнительную ценную информацию о физической природе колебания. Дело в том, что при наблюдаемых малых амплитудах, согласно теории звездных пульсаций [1, 4], профиль скорости волн тяжести должен быть гармоническим. Негармонический профиль может говорить о нелинейном механизме возбуждения, выходящем за рамки теории. Заметим, что вывод о нелинейности колебания — при разбросе наблюдательных данных на рис. 4 — пока

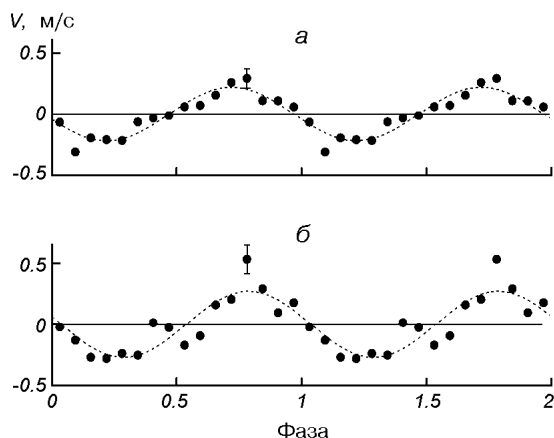
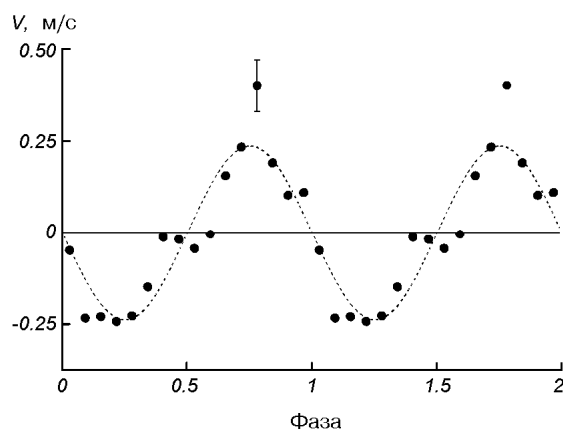


Рис. 3. Средние кривые, построенные с периодом $P_1 = 159.9655$ мин: *а* — для измерений 1974—1988 гг., $N = 74359$, *б* — 1989—2003 гг., $N = 59047$. Значения скорости усреднены в фазовых интервалах шириной $P/16$ (точки); пунктирные линии — МНК-синусоиды

Рис. 4. То же, что на рис. 3, для всех измерений 1974—2003 гг. ($N = 133406$)



имеет невысокую достоверность: 80 % по критерию χ^2 . Но этот вывод подтверждается профилем колебаний солнечного радиуса R (см. ниже).

КОЛЕБАНИЯ РАДИУСА

В связи с нелинейностью особый интерес представляет средний за 30 лет профиль периодического изменения радиуса. Расчеты сделаны для случая радиальных колебаний в крымской шкале дифференциальных измерений, при которых скорость смещения по радиусу $V_r = V/0.35$ [3].

Проинтегрировав скорость V (рис. 4), мы получили кривую изменения радиуса, показанную на рис. 5. Средняя гармоническая амплитуда колебаний R — примерно 2 км, что соответствует $A \approx (3.1 \pm 0.2) \cdot 10^{-6}$ в относительных единицах. Кривая асимметрична, что также говорит о нелинейности процесса. В интервале фаз 0.63—1.03 кривая аппроксимирована кубическим полиномом, для остальных же фаз — отрезками двух прямых. После фазы максимума ($\varphi \approx 0.03$), радиус уменьшается приблизительно по линейному закону. После фазы 0.36 он практически не изменяется в течение 40 мин (или уменьшается со скоростью, на порядок меньшей скорости предыдущего участка).

Согласно рис. 4 максимум V наблюдается на фазе 0.78, центр же интервала минимального радиуса на рис. 5 соответствует $\varphi = 0.53$. Таким образом, получается запаздывание примерно на $1/4$ периода, совпадающее с известным запаздыванием цефеид [1, 4, 5]. Асимметрия кривой — отношение интервала сжатия к интервалу расширения, равное примерно 1.5 ± 0.2 , — также согласуется с асимметрией кривых типичных цефеид. (Желательно получить профили колебаний R отдельно для первой и второй частей наблюдений, т. е. по двум кривым скорости на рис. 3. Однако деление на части понижает достоверность результата и, соответственно, вывода о нелинейности.

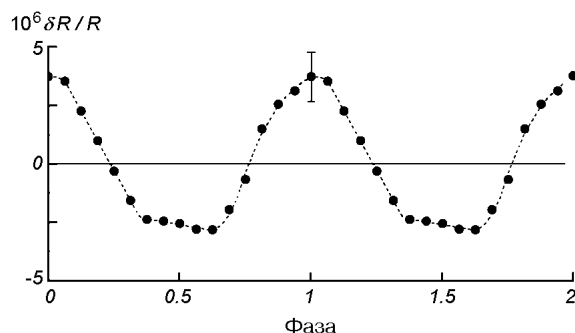


Рис. 5. Профиль относительного изменения $\delta R/R$ радиуса Солнца с периодом P_1 . Пунктир — МНК-аппроксимация

Считается, что для цефеид проблема «фазового запаздывания» решена: оно возникает в зоне второй ионизации гелия и в зоне ионизации водорода, но с учетом нелинейных эффектов. Получено решение и в линейной теории, где запаздывание связывается с перемещением тонкой зоны ионизации водорода вглубь и наружу при пульсациях. При опускании в этой зоне происходит быстрое поглощение энергии. И когда радиус звезды минимален, зона быстро перемещается наружу, приближаясь к поверхности примерно через $1/4$ периода после фазы максимального сжатия. Простые физические соображения показывают, что в этот момент и достигается наибольшая светимость звезды [1].

Но в отличие от классических цефеид «желтый карлик» Солнце — не гигант и не сверхгигант. Для него такая теория неприменима из-за отсутствия специфической «зоны ионизации водорода».

Кривые Солнца на рис. 4 и 5 очень похожи на кривые типичных звезд типа δ Sct или карликовых цефеид [5]. Считая светимость Солнца пропорциональной R^2 , для связи между амплитудами вариаций скорости V_r (в км/с) и болометрической звездной величины M находим:

$$A(V_r) = 40 \cdot A(M).$$

Коэффициент пропорциональности $K = 40 \pm 10$ в пределах ошибки совпадает со значением $K = 36$ для цефеид, 36 , и $K = 48$ для звезд типа RR Lyr. А с учетом неопределенности перехода от вариаций радиуса к вариациям светимости величину K для Солнца можно считать близкой также к коэффициенту карликовых цефеид ($K = 58$) и переменных типа δ Sct ($K = 63$) [5]. Это подтверждает вывод исследователей переменных звезд о вероятности единой закономерности для пульсирующих звезд указанных типов.

Но для Солнца, как подчеркивалось выше, никаких нелинейных и неадиабатических эффектов не должно быть. (При радиальных колебаниях неадиабатические эффекты имеют порядок P/t_k , где P — период колебания, $t_k \approx 6 \cdot 10^{14}$ с [1] — кельвиновское время, т. е. время тепловой релаксации внутренних частей Солнца). Негармонический характер кривых Солнца на рис. 4 и 5 обостряет проблему механизма пульсаций указанных звезд, включая Солнце.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Крымский 30-летний ряд доплеровских измерений Солнца доказывает существование когерентного колебания фотосферы с периодом $P_1 = 159.9655$ мин. Первоначально открытое колебание $P_0 = 160.0101$ мин проявлялось в наших измерениях только первые девять лет, с 1974 г. по 1982 г. [9]. Его природа не установлена; неизвестно также, будет ли оно наблюдаться в ближайшие годы. Колебание P_1 , в отличие от P_0 , наблюдалось на протяжении всех 30 лет; при этом средняя амплитуда за последние 15 лет в пределах ошибки совпала с амплитудой предыдущих 15 лет.

Самое поразительное, что колебание P_1 проявляет замечательную фазовую стабильность на протяжении 30 лет. Средний профиль возмущения скорости носит заметно негармонический характер, что свидетельствует о нелинейном механизме возбуждения. Особенно это касается негармоничности среднего профиля колебаний солнечного радиуса (с амплитудой 2 км для модели радиальных колебаний).

Гелиосейсмология же [8] рассматривает только малоамплитудные нормальные моды (в частности, p - и g -моды), имеющие гармонические профи-

ли скорости и радиуса. Поэтому мы снова подчеркиваем, что P_1 -колебание к таким модам не относится: в его основе лежит неизвестный, но существенно *нелинейный* механизм возбуждения.

Авторы благодарят Н. П. Русака за техническое обеспечение работы телескопа БСТ-1 и солнечного магнитографа КрАО и Н. Г. Суницю за помощь в обработке данных наблюдений, а также рецензента за полезные замечания. Работа получила поддержку ИНТАС (грант N 2000-840).

1. Кокс Дж. П. Теория звездных пульсаций. — М.: Мир, 1983.
2. Котов В. А., Левицкий Л. С. Период 160 минут, внутреннее вращение и 11-летний цикл Солнца: свидетельство взаимосвязи? // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1987.—77.—С. 51—71.
3. Котов В. А., Северный А. Б., Цап Т. Т. Исследование глобальных колебаний Солнца: II. Результаты наблюдений в 1974—1980 гг., их анализ и некоторые выводы // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.—1983.—66.—С. 3—71.
4. Росселанд С. Теория пульсаций переменных звезд. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1952.
5. Фролов М. С. Переменные звезды типа δ Шита // Пульсирующие звезды.— М.: Наука, 1970.—С. 240—262.
6. Bai T. Periodicities near 160 minutes in flare occurrence // Solar Phys.—2003.—215, N 2.—P. 327—334.
7. Brookes J. R., Isaak G. R., van der Raay H. B. Observation of free oscillations of the Sun // Nature.—1976.—259, N 5539.—P. 92—95.
8. Christensen-Dalsgaard J., Gough D., Toomre J. Seismology of the Sun // Science.—1985.—229, N 4717.—P. 923—931.
9. Kotov V. A., Haneychuk V. I., Tsap T. T., Hoeksema J. T. The splitting or disappearance of the solar 160-min mode? // Solar Phys.—1997.—176, N 1.—P. 45—57.
10. Kotov V. A., Scherrer P. H., Hoeksema J. T., et al. The search for 160-min oscillations in the Stanford and Crimean velocity observations, 1974—1991 // Publ. Astron. Soc. Pacif. Conf. Ser.—1993.—42.—P. 293—296.
11. Roxburgh I. W. Internal rotation of the Sun and the solar neutrino flux // Nature.—1974.—248, N 5445.—P. 209—211.
12. Scargle J. D. Studies in astronomical time series analysis. II. Statistical aspects of spectral analysis of unevenly spaced data // Astrophys. J.—1982.—263, N 2.—P. 835—853.
13. Scherrer P. H., Wilcox J. M. Structure of the solar oscillation with period near 160 minutes // Solar Phys.—1983.—82, N 1/2.—P. 37—42.
14. Severny A. B., Kotov V. A., Tsap T. T. Observations of solar pulsations // Nature.—1976.—259, N 5539.—P. 87—89.

Поступила в редакцию 24.05.04